

УДК 355.469.34

doi: 10.53816/20753608_2025_1_112

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ОБЛИКА
ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ
АВИАЦИОННОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**ON THE ISSUE OF SHAPING THE IMAGE
OF THE INFOCOMMUNICATION NETWORK OF AN AVIATION
MULTICOMPONENT SYSTEM BASED ON UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Академик РАРАН В.П. Кутахов, А.Е. Титов

Институт им. Н.Е. Жуковского

V.P. Kutakhov, A.E. Titov

В статье рассмотрены особенности создания инфокоммуникационной сети для организованной группы летательных аппаратов, в том числе беспилотных. Описаны виды информационных и управляющих сигналов, циркулирующих в группе и соответствующие требования к каналам связи. Представлены ссылки на существующие стандарты организации групповой связи. Определены основные преимущества и недостатки вариантов создания подобных сетей, представлены взгляды на их облик.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, групповое применение, инфокоммуникационная сеть.

The article discusses the features of creating an infocommunication network for an organized group of aircraft, including unmanned ones. Kinds of information and operating signals circulating in the group and the relevant requirements for communication channels are described. Links to existing standards for group communication organizations are provided. The main advantages and disadvantages of options for creating such networks are identified, and views on their appearance are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicle, group application, infocommunication network.

На сегодняшний момент беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются одним из наиболее перспективных направлений развития авиационной техники. Интеллектуализация всех этапов жизненного цикла БПЛА, увеличение доступных вычислительных мощностей, снижение стоимости разработки и производства БПЛА — все это приводит к пониманию БПЛА как базового технического средства, определяющего облик и тенденции дальнейшего развития авиации в целом. Эволюция развития БПЛА — это создание на их основе интеллектуальных авиационных си-

стем с постепенным переходом от относительно небольших групп однородных БПЛА, используемых в качестве вспомогательных средств (ведомых) для пилотируемых летательных аппаратов (ЛА), к появлению крупномасштабных автономизированных гетерогенных формирований, способных к решению широкого круга задач, традиционно возлагаемых на пилотируемую авиацию.

Интеллектуальная авиационная система на основе БПЛА (АС БПЛА) — это организованная группа ЛА (полностью беспилотная или смешанная), обладающая определенным уровнем

автономности, и способная к анализу окружающей обстановки, прогнозированию (планированию) развития ситуации, планированию дальнейших действий и принятию решений в рамках выполнения поставленной задачи (миссии) [1]. Под миссией понимается слабо формализованное задание — например, в определенной зоне вскрыть группировку противника и нанести этой группировке максимальный ущерб, соответствующим образом распределив информационные и огневые ресурсы и автономно принимая решения на всех этапах боевого применения.

Информационное поле авиационной системы на основе беспилотных летательных аппаратов

Одной из первостепенных задач, которую необходимо решать при создании подобных авиационных систем, является обеспечение функционирования АС БПЛА в едином информационном поле [2].

В состав интеллектуальной АС БПЛА могут входить ЛА, предназначенные как для получения информации об окружающей обстановке и целевых объектах, так и для применения различных средств функционального (огневого, информационного) воздействия, перевозки грузов, и других видов задач. Соответственно, для организации и координации комплекса разнородных технических средств и обеспечения своевременной и достоверной информацией всех элементов АС БПЛА, необходимо формирование единой инфокоммуникационной беспроводной сети внутригруппового обмена для эффективного информационного обмена между элементами АС БПЛА, а также для сопряжения подобной системы с другими формированиями (наземными, морскими, космическими) в реальном масштабе времени.

В общем случае вся передаваемая по каналам связи АС БПЛА информация делится на 2 вида: служебная информация (CNPC, Control And Non-Payload Communication) и информация, получаемая с помощью средств полезной нагрузки [3].

Служебная информация

В состав служебной информации могут входить следующие данные:

1. Управление: сюда включаются данные телеметрии от БПЛА к наземному оператору (БПЛА-лидеру), телекомандные сигналы с земли к БПЛА для дистанционно пилотируемых БПЛА (между БПЛА-лидером и управляемым БПЛА), а также регулярные команды обновления (например, обновление местоположения) для полуавтономных БПЛА. Также сюда должны включаться данные об окружающей обстановке и целевых объектах (координаты, скорость и высота цели, признаки и свойства целевого объекта и т.д.);

2. Данные для предотвращения столкновений в воздухе (sense and avoid).

Так как для эффективного применения АС БПЛА необходимо координированное управление пространственно-распределенной группой разнородных ЛА (узлов сети), то дополнительно в CNPC может включаться информация, специфичная именно для группового взаимодействия:

информация о созданной инфокоммуникационной сети (таблица маршрутизации, данные об элементах БПЛА как узлах сети и т.д.);

координаты элементов АС БПЛА;

данные об иерархии управляющих элементов АС БПЛА (информация о лидерах, постоянных или динамических).

Информация прикладного уровня (данные полезной нагрузки)

Сюда входят данные в различных спектральных диапазонах, получаемые от БПЛА, входящих в состав АС БПЛА и оснащенных сенсорами следующих типов:

- телевизионные, инфракрасные, мульти-спектральные, гиперспектральные камеры;
- радиолокаторы;
- лидары;
- средства радиотехнической разведки;
- химические, акустические датчики и др.

Формирование и функционирование инфокоммуникационной сети авиационной системы на основе беспилотных летательных аппаратов при выполнении типовых действий

Для определения необходимой пропускной способности каналов связи между отдельными элементами АС БПЛА необходимо

рассматривать процесс типового применения подобных систем (этапность) через призму внутригруппового обмена информацией.

1. Формирование состава группы исходя из предварительной информации о составе и намерениях противника, условий нанесения удара, формулировки задания, ограничений и имеющихся ресурсов.

Все БПЛА, подбираемые в состав АС БПЛА, должны обладать оборудованием, совместимым с правилами формирования предполагаемой инфокоммуникационной сетью (аппаратное обеспечение, используемые частоты, стандарты связи, протоколы маршрутизации).

2. Управление формированием группы в процессе доставки к зоне действий.

Один из БПЛА (лидер) получает задание на выполняемую миссию (перечень задач, данные маршрута, зона действия и т.д.) от наземного пункта управления (ПУ) или спутника, далее вся группа может действовать автономно исходя из уровня ее интеллектуализации (автономности). После получения задания на миссию назначается исходная точка сбора всей АС БПЛА. Первый попавший в эту точку БПЛА запускает процесс создания инфокоммуникационной сети, собирая в нее все БПЛА, оказавшиеся в зоне действия его каналов связи. После формирования такой сети и проверки наличия и готовности всей группы вся группировка «выдвигается» (вылетает) в заданную точку выполнения миссии. При полете по заранее заданным точкам маршрута высокоскоростные потоки данных не требуются, за исключением радиолокационной информации о возможных воздушных объектах. Исключение составляют экстренные и критически важные ситуации (внезапная смена задания, переформирование задания, появление технических неполадок в узле), а также периодический «обзвон» всей группы для проверки ее целостности. С учетом заранее заданного маршрута и предполагаемой зоны действия группы, на этом этапе в сети циркулирует в основном только служебная информация (навигационные данные, данные о местоположении и относительном расположении относительно друг друга элементов АС БПЛА, команды управления). В объем циркулируемой информации может также включаться новая информация при изменении маршрута, перечня предполагаемых к выполнению задач,

информации о возникающих препятствиях или появлении средств противовоздушной обороны противника.

3. Обнаружение целевых объектов.

Спектр миссий, выполняемых АС БПЛА, может включать в себя разнообразнейшие задачи, следовательно, для эффективного функционирования подобной системе необходимо детальное и своевременное знание окружающей обстановки. В первую очередь это визуальное отображение происходящего, но так же важно использовать и информацию в других радиочастотных спектрах. На этапе обнаружения целей и оценки обстановки сенсорные БПЛА, оснащенные радиолокаторами, обнаруживают примерное расположение целевых объектов и передают данные на БПЛА-лидер (динамический БПЛА-лидер, сублидер сенсорной подгруппы). После этого БПЛА-лидер передает сенсорным БПЛА, оснащенным оптико-электронной системой (ОЭС), команду выдвинуться в район целевых объектов для получения более точных данных о целевых объектах. Сенсорные БПЛА, оснащенные ОЭС, транслируют ТВ (ИК) изображение на БПЛА-лидер для обработки информации.

Данный этап является наиболее энергозатратным и уязвимым с точки зрения помехозащищенности из-за большого объема передаваемой информации. В связи с этим для АС БПЛА критически важно: во-первых — максимально возможная обработка информации на борту самого сенсорного БПЛА, во-вторых — обработка необходимого и достаточного объема информации для однозначного определения целевых объектов и боевой обстановки сенсорным кластером, и за минимальное время. Это в первую очередь зависит от уровня интеллектуализации (автономности) перспективной АС БПЛА (развитие специализированного аппаратного обеспечения, развитие технологий объединения разнородных данных и т.д.). Внутригрупповой обмен также включает данные о местоположении элементов АС БПЛА и команды управления, данные о целевых объектах и окружающей обстановке (координаты, признаки объектов, данные о метеословиях, данные о рельефе местности и т.д.).

4. Целераспределение, распределение задач конкретных воздействий на конкретные объекты между БПЛА группы.

На данном этапе происходит выработка дальнейших действий группы, принятие решений на порядок поражения целевых объектов, планирование маршрутов движения отдельных элементов АС БПЛА и группы в целом. В основном на этом этапе в наибольшей степени загружены БПЛА-лидеры, возможно периодическое обновление информации от сенсорных БПЛА. Внутригрупповой обмен включает данные о местоположении элементов АС БПЛА и команды управления.

5. Целеуказание по результатам распределения с учетом пространственного расположения БПЛА и объектов, влияния среды, особенностей информационных признаков объектов. Применение средств огневого/информационного поражения.

На данном этапе происходит пространственное передвижение БПЛА, оснащенных средствами огневого (информационного) поражения для выхода на позиции применения вооружения. Внутригрупповой обмен включает в себя данные о местоположении элементов АС БПЛА и команды управления.

6. Оценка результативности воздействий и технического состояния элементов группы БПЛА.

Данный этап также является насыщенным с информационной точки зрения, так как для оценки нанесенного противнику ущерба должны быть задействованы БПЛА, оснащенные сенсорами. Внутригрупповой обмен схож с подобными на этапе обнаружения целевых объектов.

7. Реконфигурация АС БПЛА, возвращение к этапу № 3, но в новых текущих условиях.

Данный этап может входить в качестве подэтапа в любой из вышеописанных. При изменении условий выполнения миссии система управления должна внести коррекцию в инфокоммуникационную сеть вследствие возможного изменения состава группы. Внутригрупповой обмен включает в себя данные о местоположении элементов АС БПЛА и команды управления.

Необходимо отметить, что акцент боевых действий в ближайшей перспективе будет смещаться на действия в условиях урбанизированной инфраструктуры на относительно небольших площадях, следовательно, главным фактором, определяющим облик инфокоммуника-

ционной сети, будет не возможность передачи данных на больших дальностях, а адаптивность и масштабируемость самой сети, возможность ее использования в условиях местности, насыщенной антропогенными объектами, а также возможность динамического подключения/отключения к такой сети крайне большого количества высокоомобильных технических средств, причем движущихся не на плоскости, а во всех трех измерениях.

Варианты топологии инфокоммуникационной сети АС БПЛА

Инфокоммуникационная сеть, предполагаемая к использованию в АС БПЛА, может обладать следующей топологией [4–7]:

1. Централизованная авиационная система с ярко выраженным лидером (БПЛА или пилотируемым ЛА) и несколькими БПЛА различной функциональной направленности. В качестве такого лидера может использоваться наземный пункт управления. БПЛА, отвечающие за получение информации о целевых объектах и окружающей обстановке, передают данные для дальнейшей обработки на БПЛА-лидер. Все БПЛА, используемые в такой системе, обмениваются информацией и получают команды управления непосредственно от лидера. Подобный способ организации сети является наиболее простым, однако при отключении (выведении из строя) центрального узла такой сети (БПЛА-лидер, наземный ПУ), АС БПЛА с таким уровнем интеллектуализации (автономности) просто перестает существовать.

2. Частично распределенная система с возможностью выстраивания иерархической цепочки управления с использованием нескольких сублидеров, каждый из которых в пределах приданных ему полномочий управляет подгруппой БПЛА для решения частной задачи. В этом случае БПЛА, оснащенные сенсорами, могут обмениваться информацией об окружающей обстановке между собой с обработкой данных на борту, и выдают своему сублидеру уже частично обработанную информацию о целевых объектах и окружающей обстановке, объединенную от разных источников. Соответственно, появляется возможность уменьшить объем передаваемых по сети данных, так как нет необходимости

передавать всю полученную информацию на один специализированный вычислитель.

3. Автономизированная система с распределенным управлением без ярко выраженного лидера. В зависимости от выполняемой подзадачи на время ее выполнения назначается динамический лидер группы, выделяемой для решения этой подзадачи. Обработка всей информации, получаемой БПЛА, оснащенной сенсором, происходит на его борту, соответственно, этот БПЛА в качестве выходной информации выдает только данные о целевом объекте (координаты, признаки цели и т.д.) и/или передает такие же данные и команды управления, выполняя роль передаточного узла единой динамической сети. Также, в случае полностью одноуровневой многоагентной системы, организация инфокоммуникационной сети может осуществляться на основе методов роевого интеллекта. Таким образом, на таком этапе развития информационных технологий и вычислительных мощностей уже нет необходимости в постоянной передаче больших потоков данных в реальном масштабе времени. Это наиболее предпочтительная и перспективная архитектура связи, однако представляется, что протоколы маршрутизации такой сети (динамическое формирование сети, причем распределенной по трем измерениям) крайне сложны. Необходимо отметить, что имеет место парадоксальная ситуация: на низких уровнях интеллектуализации и недостаточных уровнях развития технологий обработки информации требуются технологии связи, позволяющие передавать большие потоки данных, а при достижении возможности сформировать высокоавтономизированную АС БПЛА с возможностью обработки получаемой информации на борту

сенсорных элементов АС БПЛА, передаваемая информация может ограничиваться командами управления и навигации.

Требования к каналам связи БПЛА в гражданской сфере применения

Согласно 3GPP (3rd Generation Partnership Project) — консорциуму, разрабатывающему спецификации для мобильной телефонии для гражданских БПЛА, имеют место следующие спецификации для служебной информации и данных полезной нагрузки БПЛА (табл. 1).

Также существуют следующие типовые требования по связи для БПЛА для решения различных задач гражданской направленности (табл. 2).

Из наиболее перспективных на сегодняшний день технологий беспроводной связи, можно выделить следующие виды (табл. 3) [8].

Что касается военной области применения, то для унификации требований, предъявляемых к каналам связи между БПЛА в странах НАТО, используются следующие стандарты [9, 10]:

- STANAG 4609 — содержит основные требования по скорости передачи данных от бортовых сенсоров;
- STANAG 7023 — регламентирует формат передачи потоков данных с борта БПЛА;
- STANAG 4607 — регламентирует передачу данных с беспилотных авиационных платформ;
- STANAG 7085 — определяет требования к радиолиниям связи с БПЛА, совместимым с тактическими средствами Common Data Link;
- STANAG 4660 — регламентирует все аспекты высокозащищенного канала обмена данными для БПЛА IC2 DL (Interoperable Command and Control Data Link).

Таблица 1

Требования по связи БПЛА, определенные 3GPP

Линия	Тип данных	Скорость передачи данных	Надежность	Задержка
DL (от наземного ПУ к БПЛА)	Команды и управление	60...100 кбит/с	Частота ошибок 10^{-3} на пакет	50 мс
UL (от БПЛА к наземному ПУ)	Команды и управление	60...100 кбит/с	Частота ошибок 10^{-3} на пакет	—
	Прикладные данные	до 50 мбит/с	—	Схожа с наземным пользователем

Таблица 2

Требования по связи для типовых применений БПЛА

Тип использования БПЛА	Покрытие по высоте, м	Задержка передачи данных полезной нагрузки,	Скорость передачи данных полезной нагрузки (DL/UL)
Доставка с помощью БПЛА	100	500	300 кбит/с / 200 кбит/с
Киносъемка с помощью БПЛА	100	500	300 кбит/с / 30 мбит/с
Точка доступа	500	500	50 мбит/с / 50 мбит/с
Наблюдение	100	3000	300 кбит/с / 10 мбит/с
Обследование инфраструктуры	100	3000	300 кбит/с / 10 мбит/с
Шоу дронов	200	100	300 кбит/с / 200 кбит/с
Точное земледелие	300	500	300 кбит/с / 200 кбит/с
Поисково-спасательная операция	100	500	300 кбит/с / 6 мбит/с

Таблица 3

Сравнение технологий беспроводной связи

Категория	Технология	Скорость передачи данных	Дальность	Задержка, мс
WPAN	Bluetooth 4.0	< 1 Мб/с	60 м	50
WPAN	Zigbee	< 256 Кб/с	< 100 м	50
WLAN	802.11a/b/g/n/ac	< 600 Мб/с	< 250 м	75
WLAN	WAVE 802.11p	< 27 Мб/с	< 1 км	50
LPWA	LoRA	< 50 Кб/с	< 15 км	82
LPWA	SigFox	< 100 б/с	< 20 км	82
Мобильная	NB-IoT	< 250 Кб/с	< 10 км в городской черте / < 40 км на открытой местности	75
Мобильная	LTE-M	< 1 Мб/с	< 11 км	75
Мобильная	LTE Advanced (4G)	< 1 Гб/с	< 10 км	50
Мобильная	5G	< 10 Гб/с	Менее 1 км	3

Облик инфокоммуникационной сети АС БПЛА

Исходя из соображений о структуре и типовом процессе применения АС БПЛА, можно сделать следующие (предварительные) выводы об облике предполагаемой инфокоммуникационной сети для АС.

1. Для создания перспективных АС БПЛА необходимо использование так называемых ad hoc сетей — децентрализованных динамических беспроводных сетей без постоянной структуры. Необходима возможность такой сети обладать

масштабируемостью и адаптивностью, так как распределенная АС БПЛА будет действовать в быстро меняющейся боевой обстановке, необходимо иметь возможность легко добавлять и убирать отдельные элементы группы. Вследствие необходимости максимально уменьшить возможность воздействия на инфокоммуникационную сеть, большая часть незадействуемых элементов сети должна находиться в «спящем» режиме, передавая информацию по сети только тогда, когда это требуется.

2. С учетом типового процесса применения АС БПЛА и анализа существующих стандартов

пропускная способность одного канала связи при передаче изображения (full hd, 1920×1080×30p) должна составлять не менее 20 Мбит/с, а пропускная способность канала связи для сигналов CNPC — не менее 300 Кбит/с.

3. Необходимо системное, параллельное развитие и внедрение не только технологий связи, но и компьютерных технологий:

- развитие методов сжатия информации (применение более эффективных видеокодеков);
- развитие методов обработки изображения (использование технологий глубокого обучения и специализированного аппаратного обучения);

- развитие облачных технологий, с возможностью использования удаленного облачного центра для обработки всей информации, поступающей от АС БПЛА;

- развитие так называемых оконечных технологий (edge computing);

- развитие методов объединения информации от разнородных источников (технологии data/sensor fusion).

4. Для обеспечения требуемой надежности формируемой сети, наиболее подходящей является mesh-топология, при которой каждый элемент сети может одновременно являться и маршрутизатором, и оконечным устройством.

5. Формируемая сеть должна учитывать высокую мобильность ее составных элементов, причем в трех измерениях, а также меняющуюся скорость элементов сети, то есть необходимы динамические протоколы геопространственной маршрутизации, учитывающие эти особенности.

6. Наиболее перспективными являются технологии пятого поколения мобильной связи: возможность работы с высокомобильными техническими средствами, большая пропускная способность, возможность работы с большим количеством технических средств одновременно, beamforming (технология формирования направленного луча), Multi-MIMO (технология увеличения спектральной эффективности радиоканала), и т.д., малая потребляемая мощность. Главным недостатком 5G является ее малая эффективная дальность применения, в качестве возможного варианта преодоления подобного ограничения — построение базовой ретрансляционной бесшовной сети, состоящей из большого количества недорогих БПЛА-маршрутизаторов;

7. В среднесрочной перспективе процесс эволюции массогабаритных характеристик БПЛА будет смещаться в сторону миниатюризации, соответственно, весьма вероятно, что и аппаратное обеспечение связи также будет стремиться к упрощению и миниатюризации.

Список источников

1. Кутахов В.П., Титов А.Е. Крупномасштабные авиационные системы с беспилотными летательными аппаратами — новая парадигма боевых действий // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. Вып. № 19. С. 212–221.

2. Титов А.Е. Вопросы интеллектуализации управления системами на основе беспилотных летательных аппаратов // Материалы XX научных чтений по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2023. С. 120–131.

3. Yung Zeng, Qingqing Wu, Rui Zhang. Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond // Proceedings of the IEEE, 2019. 46 p.

4. Xi Chen, Jun Tang, Sungyang Lao. Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols, 2020. 17 p.

5. Godwin Asaamoning, Paolo Mendes et al. Drone Swarms as Networked Control Systems by Integration of Networking and Computing // Sensors. 2020. Pp. 1–23.

6. Динь Чьунг Зюи. Разработка методов построения и функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб: дисс. на соис. уч. степени канд. технич. наук. Санкт-Петербург, 2020. 172 с.

7. Rana Abdallah. Reliability approaches in networked systems: Application on Unmanned Aerial Vehicles // HAL, 2019. 140 p.

8. Thomas Lagkas, Vasileos Argyriou. UAV IoT Framework Views and Challenges: Towards Protecting Drones as ‘Things’ // Sensors, 2018. 21 p.

9. Mustafa Dinc. Design Considerations for Military Data Link Architecture in Enabling Integration of Intelligent Unmanned Air Vehicles (UAVs) with Navy Units // Researchgate, 2013. 14 p.

10. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. Вып. 3. С. 80–88.